

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ КОМПЛЕКСА С ЛИНЕЙНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

### APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION PROGRAMS FOR CALCULATION OF PROTECTION FOR COMPLEX WITH LINEAR ELECTRON ACCELERATOR AS A RADIATION SOURCE

*Е. Т. Батова, В. И. Потанин, О. Ю. Пашарина*

*E. T. Batova, V. I. Potapin, O. Yu. Pasharina*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

При проектировании комплексов зданий и сооружений с применением ускорителя электронов в качестве источника излучения необходимо обеспечение требований НРБ – 99/2009 как для персонала группы Б, так и для населения: при работе ускорителя ускоренные электроны и возникающее тормозное излучение создают высокую мощность поглощенной дозы в помещении, превышающую установленные НРБ – 99/2009 пределы.

Для выбора материалов и оптимизации толщин биологической защиты ускорителя, генерирующего электроны с максимальной энергией 9 МэВ, использовали возможности программ численного моделирования «ЭЛИЗА» и «ТРИАДА»: рассчитали спектрально-угловое распределение тормозного излучения проектируемого ускорителя с выбранной конструкцией мишени, определили кратности ослабления излучения при различных комбинациях защиты ускорителя, оценили мощность эквивалентной дозы на территории расположения комплекса.

When designing a complex of buildings and constructions, using an electron accelerator as a radiation source, one should supply requirements of radiation standards – 99/2009 both for personnel of group B, as well as for population: while the accelerator is operating, accelerated electrons and arising bremsstrahlung develop a high absorbed dose power in the room, exceeding 99/2009 limits fixed by radiation standards.

To select materials and optimize thickness of biological accelerator's protection generating electrons with maximal energy 9 MeV, there are used capabilities of numerical simulation programs «ELIZA» and «TRIADA»: a spectral-angular distribution of designed accelerator bremsstrahlung with a selected target structure is calculated, attenuation of radiation orders at different combinations of radiation protection are determined, equivalent dose power on the location area of the complex is estimated.

Обеспечение «контроля без вскрытия» содержимого железнодорожных вагонов реализуется при проведении рентгенографического исследования железнодорожного состава. В качестве источника излучения возможно применение линейного резонансного ускорителя электронов. В этом случае необходимо проведение расчетов биологической защиты и проведение оценки мощности эквивалентной дозы на территории размещения ус-

корителя электронов, а именно, вдоль туннеля, по которому следует железнодорожный состав.

Рассмотрен ускоритель со следующими характеристиками:

- максимальная энергия ускоренных электронов 9 МэВ;
- среднее значение тока ускоренных электронов 0,4 мА;
- диаметр пучка ускоренных электронов на мишени – до 5 мм.

При многочасовой непрерывной работе ускорителя, генерирующего пучок электронов с максимальной энергией 9 МэВ, необходимо предусмотреть факторы, влияющие на безопасность персонала. В результате торможения электронов пучка в мишени возникает тормозное излучение (ТИ), которое, взаимодействуя с материалами биологической защиты, со стенкой вагона и его содержимым в процессе рентгенографического исследования обуславливает рассеянное и отраженное излучение. Гамма – кванты такого излучения с энергиями до 9 МэВ обладают высокой проникающей способностью. При работе ускорителя в области выходного окна оцененная мощность поглощенной дозы ТИ составляет 1800 Гр/ч. В целях обеспечения радиационной безопасности персонала необходимо провести расчет защиты ускорителя и обеспечить нормы радиационной безопасности для персонала в соответствии с [1].

Для проведения расчета защиты использовали возможности программ математического моделирования физических процессов методом Монте-Карло «ЭЛИЗА», «ТРИАДА» [2,3].

На первом этапе по программе «ЭЛИЗА» проведены расчеты спектра и спектрально-углового распределения ТИ. Схема геометрии расчетов: точечный источник генерирует в телесный угол 0.00272 ср спектр электронов на танталовую мишень толщиной 2 мм. Данные о спектре электронов получены из результатов предварительных электрофизических расчетов ускорителя. В результате проведенных расчетов получены спектральное и угловое распределения квантов ТИ, представленные в виде графика на рисунке 1 и виде диаграммы на рис. 2, где  $E$  – энергия квантов, МэВ.

Данные о спектрально-угловом распределении квантов ТИ являются входными параметрами –

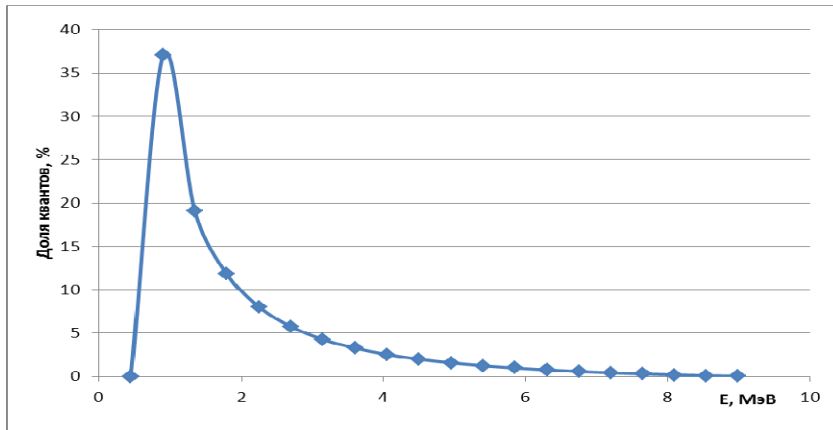


Рис. 1. Расчетный спектр ТИ при максимальной энергии электронов 9 МэВ

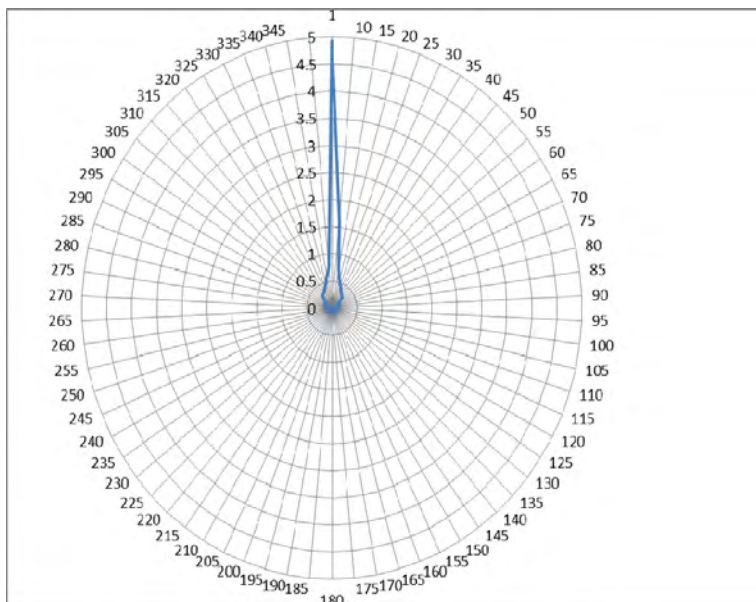


Рис. 2. Индикатриса ТИ

параметрами источника – для расчета и последующей оптимизации толщин защитных материалов. Расчет биологической защиты заключается в определении толщин защитных материалов, обеспечивающих необходимую кратность ослабления излучения,  $k$ , отн.ед. [4].

На первом этапе по программе «ТРИАДА» проведены расчеты кратности ослабления ТИ в слоях бетона. На втором этапе по программе «ЭЛИЗА» проведены расчеты кратности ослабления ТИ в слоях свинца и расчеты с комбинацией материалов: в расчетах заданы слои из свинца, бетона и воздуха. Геометрия этого расчета схематично представлена на рис. 3: источник излучения моделируется как плоский бесконечный источник, генерирующий спектр квантов ТИ, перпендикулярно направленными к поверхностям слоев свинца, воздуха и бетона. Последним задан слой воды для оценки эквивалентной дозы. Задание бесконечно-

го источника и слоев защиты позволяет учесть фактор накопления [4].

В результате расчетов по программам «ТРИАДА» и «ЭЛИЗА» получены значения флюенса квантов и флюенса энергии квантов ТИ через поверхности защитных материалов, а также поглощенные энергии внутри них. В результате расчетов по программе «ТРИАДА» определено значение кратности ослабления 10 см бетона равное 2. Анализ результатов расчетов по программе «ЭЛИЗА» показал, что кратность ослабления 5 см свинца равна 9,5. Статистическая погрешность расчетных значений не превысила 3 %. Рис. 4 иллюстрирует ослабление потоков квантов ТИ свинцом.

Для обеспечения необходимой кратности ослабления излучения,  $k_n$  требуется оценить значение проектной предельно-допустимой мощности эквивалентной дозы  $P_{\text{пред}}$ . Предполагая возмож-

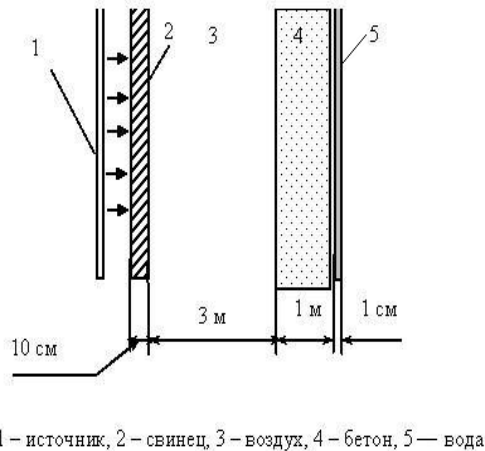


Рис. 3. Геометрия расчета ослабления излучения в материалах защиты

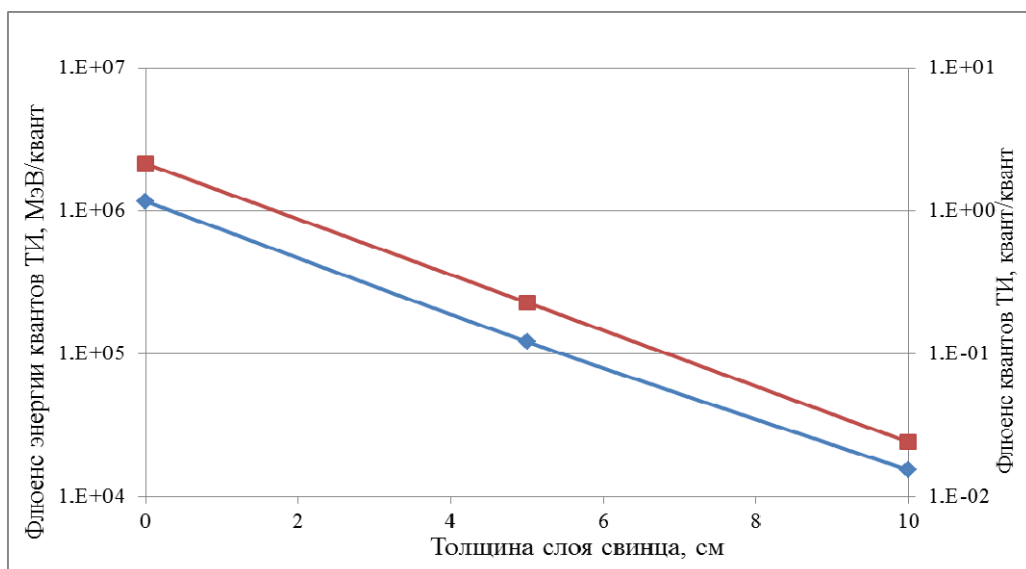


Рис. 4. Ослабление ТИ при прохождении слоев свинца

ность нахождения персонала, не связанного с управлением ускорителем, в смежных с ускорительным залом помещениях, расчет защиты ускорителя производится для персонала группы Б. В этом случае, по требованиям НРБ – 99/2009 [1], не должен быть превышен предел эквивалентной дозы 5 мЗв за год. Для предотвращения воздействия излучения на население, необходимо оценить мощность эквивалентной дозы на территории размещения ускорителя, а именно: внутри железнодорожного туннеля.

В табл. 1 представлены результаты расчета проектной предельно-допустимой мощности эквивалентной дозы  $P_{ПРЕД}$  с коэффициентом запаса, равным 2.

Используя максимальную величину мощности дозы, создаваемую ускорителем  $P_y$ , Гр/ч, а также исходя из вышеуказанного значения предельно допустимой мощности дозы для персонала группы Б, получаем необходимую кратность ослабления  $k_n$ , отн.ед.:

$$k_n = \frac{P_y}{P_{ПРЕД}}, \quad \text{где } P_y = 1800 \text{ Гр/ч} \quad (1)$$

Максимальная мощность дозы является значительной, нахождение человека в ускорительном зале во время работы ускорителя не допускается. Для безопасной работы персонала группы Б в смежных помещениях значение  $k_n$  составит  $1,5 \cdot 10^9$ .

Индикатриса ТИ, полученная в расчетах и представленная на рис. 3, показала, что значитель-

ная часть ТИ выделяется в диапазоне значений углов от  $0^\circ$  до  $10^\circ$  от оси ускорителя. Планируемое расположение рабочего места в смежном с ускорительным залом помещении соответствует излучению квантов в диапазон углов от  $70^\circ$  до  $110^\circ$  от оси ускорителя. Рассчитанная доля энергии в телесный угол  $0,3768$  ср, соответствующий углу раствора конуса  $40^\circ$  с центральной осью, перпендикулярной оси ускорителя, не превышает 15 % от энергии в угол  $0,0021$  ср, соответствующий углу раствора конуса  $1^\circ 30'$  от оси ускорителя. При проведении расчетов вклады от отраженного излучения от поверхности пола, потолка и стен помещения не учитывали.

Значение  $k$  по алгоритму [4]  $1,5 \cdot 10^9$ , значение кратности ослабления  $k_{оп}$  с учетом индикатрисы ТИ в шесть раз меньше и составит  $2,5 \cdot 10^8$ , что позволяет оптимизировать толщины и стоимость защитных материалов. В табл. 2 представлены варианты исполнения защиты и соответствующие значения  $k$ .

При работе ускорителя и в процессе рентгенографического исследования содержимого вагона возникает рассеянное излучение и отраженное излучение. Для определения границ санитарно-защитной зоны и мест установки заграждений необходимо оценить распределение мощности эквивалентной дозы вдоль железнодорожного туннеля. С этой целью были проведены отдельные расчеты, эскиз геометрии которых показан на рис. 5.

Таблица 1

Мощность эквивалентной дозы, используемая при расчете защиты

Категория облучаемых лиц	Назначение помещений	Продолжительность облучения, час/год	Предельная допустимая мощность эквивалентной дозы, $P_{ПРЕД}$ , мкЗв/ч
Персонал группы Б	Помещения постоянного пребывания персонала	2000	1,2
Население	Граница санитарно-защитной зоны	8800	0,06

Таблица 2

Кратность ослабления излучения для разных вариантов исполнения защиты

Назначение помещений	Значение $k_{оп}$ , отн.ед.	Расстояние до точки измерений, м	Толщина свинца, см	Толщина бетона, см	Расчетное значение $k_{расч}$ , отн.ед.
Пребывание персонала группы Б	$2,5 \cdot 10^8$	4	15	140	$3,0 \cdot 10^8$
			10	170	$2,9 \cdot 10^8$
			20	110	$3,4 \cdot 10^8$

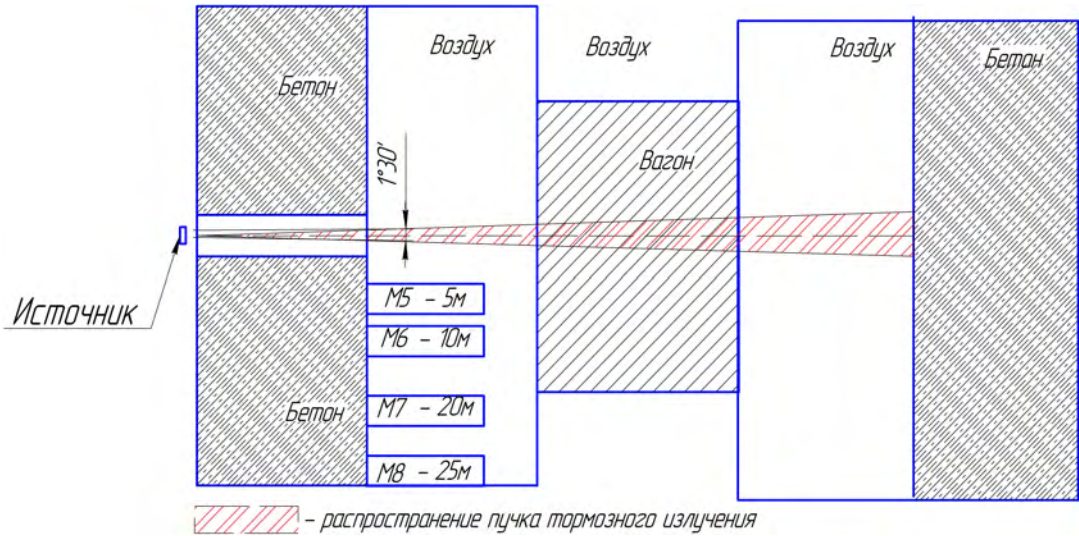


Рис. 5. Эскиз схемы расчета дозы вдоль туннеля

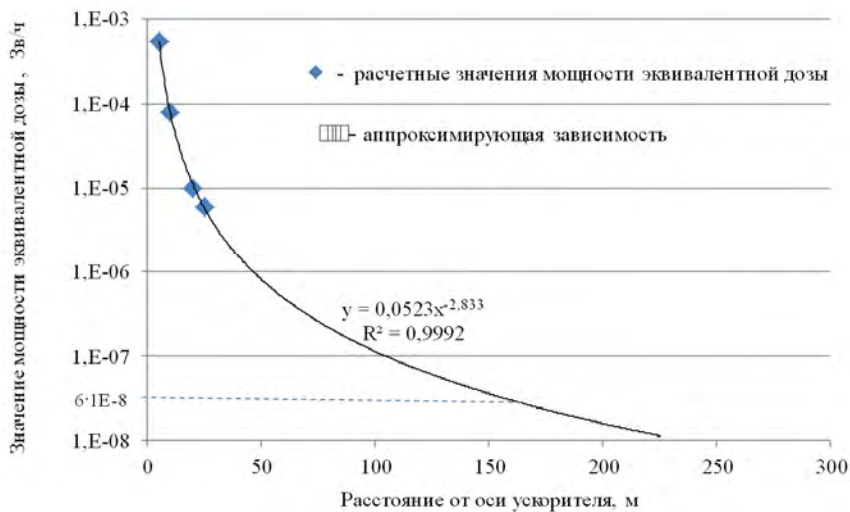


Рис. 6. Спад мощности эквивалентной дозы внутри туннеля

Схема геометрии расчета: детектор из тканеэквивалентного материала располагался вдоль туннеля на расстояниях от оси ускорителя соответственно 5, 10, 20 либо 25 м перпендикулярно оси пучка. Источник излучения испускает в телесный угол 0,0021 ср спектр ТИ, полученный в предыдущих расчетах. Геометрия расчетной задачи учитывает стены комплекса, предполагаемое размещение ускорителя и площадь поверхности вагона. Оцененные значения мощности эквивалентной дозы представлены в табл. 3, аппроксимирующая зависимость, характеризующая спад мощности эквивалентной дозы внутри туннеля с увеличением расстояния представлена на рис. 6. Минимальное расстояние в направлении перпендикулярном оси пучка, на котором обеспечиваются пределы доз для населения при проведении рентгенографи-

ческого исследования железнодорожного состава, оценивается в 200 м, рекомендуемое расстояние, на котором необходимо устанавливать заграждения – 250 м.

Таблица 3

Оцененные значения мощности эквивалентной дозы в туннеле

Расстояние от оси пучка, м	5	10	20	25
Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч	540	80	10	6

## Заключение

Для выбора материалов и оптимизации толщины защиты использовали программы «ЭЛИЗА» и «ТРИАДА»: рассчитаны спектрально-угловое распределение ТИ проектируемого ускорителя, рассчитаны кратности ослабления ТИ слоями свинца и бетона, оценили кратность ослабления ТИ при различных комбинациях материалов защиты. Предлагаемые варианты компоновки материалов и толщин защиты с учетом индикатрисы ТИ обеспечивают соблюдение НРБ–99/2009 в помещениях, доступных для работы персонала группы Б, с запасом по мощности эквивалентной дозы, равным 2. Минимальное расстояние в направлении, перпендикулярном оси ускорителя, на котором обеспечиваются пределы доз для населения при проведении рентгенографического исследования железнодорожного состава, оценивается в 200 м.

## Список литературы

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009) Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09.
2. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
3. Грунин А. В., Шмаров А. Е. Программирование Монте-карловских задач с визуализацией процесса расчета. // Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник докладов. 11–15 октября 2004 г. С. 53–59.
4. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. – Москва: Энергоатомиздат, 1995.